



# Méthode thermique d'évaluation de la qualité du collage bitume sur granulat par mesure de la résistance thermique de contact dans les conditions de fabrication d'enrobé bitumineux

Saannibe Ciryle Some, Vincent Gaudefroy, D Delaunay

## ► To cite this version:

Saannibe Ciryle Some, Vincent Gaudefroy, D Delaunay. Méthode thermique d'évaluation de la qualité du collage bitume sur granulat par mesure de la résistance thermique de contact dans les conditions de fabrication d'enrobé bitumineux. 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. 6p. hal-00879680

**HAL Id: hal-00879680**

**<https://hal.science/hal-00879680>**

Submitted on 4 Nov 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode thermique d'évaluation de la qualité du collage bitume sur granulat par mesure de la résistance thermique de contact dans les conditions de fabrication d'enrobé bitumineux

S.C. SOME<sup>a</sup>, V. GAUDEFROY<sup>a</sup>, D. DELAUNAY<sup>b</sup>

*a. UNAM Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais*

*b. Laboratoire de Thermocinétique de l'École Polytechnique de l'Université de Nantes, UMR CNRS 6607 Rue Christian Pauc, BP 50609 44306 Nantes cedex, France*

## Résumé:

*Les chaussées bitumineuses sont obtenues après malaxage de granulats et de bitume préalablement chauffés entre 100°C et 160°C. Ces températures de fabrication des enrobés bitumineux ont une importance capitale afin de garantir un bon collage du bitume sur les granulats. Cependant l'évaluation précise de la qualité de collage reste un vrai challenge. Cette étude présente une démarche thermique purement numérique d'évaluation de la qualité du collage à partir de la détermination de la résistance de contact à l'interface bitume-granat. On vise à interpréter cette résistance thermique de contact comme un indicateur de la qualité de collage.*

## Abstract:

*Asphalt pavements are obtained after mixing aggregates and bitumen both preheated between 100 °C and 160 °C. These asphalt manufacturing temperatures are important to ensure good bonding of the bitumen on aggregates. However, the precise evaluation of the bonding capacity remains a challenge. This study presents a numerical thermal approach of evaluation of the quality of bonding based on the determination of the thermal contact resistance at the interface between bitumen and aggregate. We aim to interpret the thermal contact resistance as an indicator of the quality of bonding.*

**Mots clés :** résistance thermique de contact, propriétés thermiques, méthode inverse, bitume

## 1. Introduction

La fabrication des enrobés bitumineux à chaud pour les structures de chaussées s'effectue par malaxage de liant hydrocarboné (bitume) avec des granulats. Au cours de la fabrication de l'enrobé bitumineux, le bitume et la fraction granulaire sont chauffés généralement à 160°C (on parle d'enrobé à chaud) afin de sécher complètement les granulats et de modifier l'état rhéologique du bitume pour atteindre une viscosité d'enrobage. Les constituants sont ensuite malaxés. Les températures mises en jeu jouent un rôle important au niveau du collage du bitume sur les granulats et sur les performances du matériau. De nouveaux procédés de fabrication des enrobés appelés « tièdes » sont apparus depuis les dix dernières années. Elles consistent à chauffer les granulats à des températures de 30°C à 60°C de moins que la technique de référence à chaud. Bien que ces procédés permettent de réduire les consommations d'énergie et les rejets de CO<sub>2</sub>, ils peuvent entraîner un mauvais collage du bitume sur les granulats et conduire à des défauts d'enrobage qui sont autant de zones fragiles dans la chaussée pouvant réduire sa durabilité. Durant la phase de malaxage des enrobés, des transferts thermiques essentiellement conductifs s'opèrent entre le bitume et le granulat lorsqu'ils sont en contact. La nature de ce contact, parfait ou imparfait, entre le bitume et le granulat affectent ces échanges thermiques. Pour étudier la qualité du collage pendant la phase de fabrication nous avons entrepris de déterminer la Résistance Thermique de Contact (RTC) résultant de leur mise en contact. En effet, la RTC dépend de l'épaisseur de lame d'air piégé dans les rugosités à l'interface. Cette épaisseur peut être modifiée par la température des constituants au cours de la fabrication. Nous espérons alors que la RTC pourra être considérée comme un indicateur de la qualité du collage. Il est nécessaire au préalable de connaître avec précision les propriétés thermiques (masses volumiques, capacités calorifiques et conductivités thermiques)

des matériaux en fonction de la température correspondant aux températures de fabrication. Ces données s'obtiennent à l'aide d'essais expérimentaux (DSC, PVT, plaque chaude gardée [1]).

Les travaux d'Edwin et Barth [2] et de Masson et Polomark [3] sur les bitumes ont montré une augmentation de la chaleur spécifique en fonction de la température dans une plage de -100°C à 150°C. Ces études ont en outre mis en évidence les variations de la conductivité thermique entre 0 et 70°C. Les variations de la masse volumique des bitumes dépendent aussi de la température [4].

L'objectif principal de cet article consiste à présenter une approche numérique de caractérisation de la qualité du collage à partir de la résistance thermique de contact en se basant sur un dispositif expérimental permettant la détermination de la RTC [1] dont nous présenterons le principe de fonctionnement.

Un accent sera mis sur la démarche de résolution du problème de conduction inverse permettant de déterminer la résistance thermique de contact (RTC) interprétée comme indicateur de la qualité de collage.

## 2. Propriétés thermiques des matériaux

### 2.1 Chaleur spécifique

L'évolution de la capacité calorifique du bitume en fonction de la température a été étudiée [3]. Cette étude montre qu'entre 0°C à 150°C, la capacité calorifique présente une augmentation quasi-linéaire en fonction de la température. Dans ce domaine, la capacité calorifique est approximée par un polynôme du premier degré. De la même manière la capacité calorifique du granulat de type granitique a été approximée également par un polynôme de 1<sup>er</sup> degré entre 0 et 200°C. Les caractéristiques obtenues sont regroupées dans le Tableau 1.

### 2.2 Masse volumique

La masse volumique du bitume décroît en fonction de la température [4]. Pour la résolution du problème posé dans la Partie 4 de ce document nous avons approximé la masse volumique du bitume par une fonction polynomiale de degré 1 pour des températures comprises entre 0°C et 200°C. La masse volumique du granulat est prise constante dans ce domaine de température. Les valeurs sont données dans le Tableau 1.

### 2.3. Conductivité thermique

La conductivité du bitume est issue de la référence [4] et son évolution en fonction de la température est approximée par un polynôme du second degré présenté dans le Tableau 1. La conductivité des granulats est approximée aussi par un polynôme du second degré.

Grandeur	Granulat (type granitique)	Bitume
Masse volumique (kg m <sup>-3</sup> )	$\rho_g = 2589.1$	$\rho_b(T) = -0.775 \times T + 1064.2$
Chaleur spécifique (J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$C_g(T) = 0.1221 \times T + 787.64$	$C_{pb}(T) = 3.29 \times T + 1492$
Conductivité thermique (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$\lambda_g(T) = 8 \times 10^{-7} T^2 + 3.2 \times 10^{-3} T + 1.9396$	$\lambda_b(T) = 3 \times 10^{-7} T^2 + 8 \times 10^{-4} T + 0.1459$

Tableau 1: Caractéristiques du granulat et du bitume

## 3. Principe expérimental du dispositif de mesure de la qualité de collage

Le dispositif expérimental de mesure de la résistance thermique de contact (RTC) a été développé par Le Goff *et al.* [1]. Il a été conçu pour étudier la solidification de polymères thermoplastiques lors de la mise en forme sans effet de cisaillement. L'essai consiste à mettre en contact un polymère initialement chauffé avec un échantillon métallique froid. L'échantillon métallique est équipé de fluxmètre permettant de suivre finement l'évolution de la température dans l'échantillon métallique après sa mise en contact avec le polymère. Un thermocouple T4 placé au fond du polymère permet de contrôler sa température. Dans le cas de notre étude, ce dispositif a été modifié afin de remplacer l'échantillon métallique par un granulat de forme cylindrique et le polymère par du bitume (FIG 1). Le système de chauffage a été également modifié de façon à chauffer simultanément le granulat et le bitume à des températures différentes (respectivement 120°C et 160°C). L'échantillon de bitume est chauffé par les plateaux P1 et P2. Le granulat est chauffé par sa surface inférieure par la partie supérieure du plateau P1 et sur sa surface supérieure et isolé sur sa surface latérale afin d'avoir une température uniforme dans le granulat avant la mise en contact. Après stabilisation

des températures des échantillons (granulat et bitume), le plateau P1 est retiré puis le cylindre de granulat est mis brusquement en contact avec le bitume. Les thermocouples T1 T2 et T3 placés dans le granulat permet d'enregistrer les évolutions de température après la mise en contact. Les thermocouples T1, T2 et T3 sont situés respectivement à  $x_1 = 1.5\text{mm}$ ,  $x_2 = 12\text{mm}$  et  $x_3 = 30\text{mm}$  de la surface de contact. Le thermocouple T4 est situé à  $x_4 = -10\text{mm}$  de l'interface bitume-granulat.

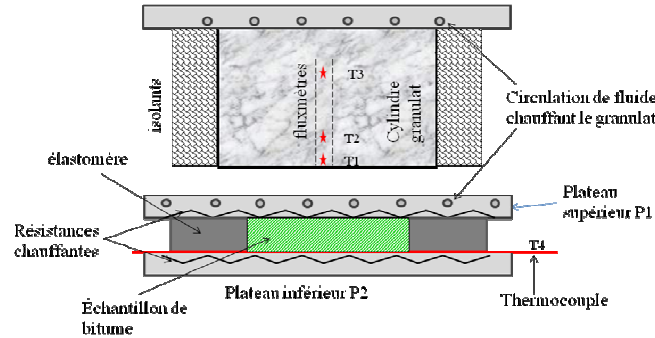


FIG 1: schéma du dispositif de mesure de la RTC

## 4. Modélisation de l'expérience

### 4.1 Formulation du problème inverse de conduction et démarche de résolution

Le bitume et le granulat sont initialement chauffés respectivement à  $160^\circ\text{C}$  et  $120^\circ\text{C}$  ce qui assure une diffusion de la chaleur du bitume vers le granulat. Pour décrire les transferts thermiques entre le granulat et le bitume après la mise en contact, nous devons résoudre le problème unidimensionnel de conduction décrit par les équations suivantes :

$$\rho_g(T)C_{pg}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (1)$$

$$-\lambda_g(T)\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = \phi(0,t) \quad (2)$$

$$\rho_b(T)C_{pb}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_b(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (3)$$

La résistance thermique de contact est obtenue à partir du flux et du saut de température à l'interface bitume-granulat.

$$RTC(t) = \frac{T_g(x=0,t) - T_b(x=0,t)}{\phi(t)} \quad (4)$$

$T_b$  et  $T_g$  désignent respectivement les températures à l'interface du bitume et du granulat et  $\phi(t)$  le flux.

Pour la résolution du problème, nous avons choisi la méthode de Raynaud et Bransier. Cette méthode consiste à découper le problème en trois zones : une zone directe comprise entre les thermocouples T1 et T2 où le problème admet des conditions aux limites de types températures imposées ; il est ainsi bien posé, une zone inverse comprise entre l'interface bitume-granulat et le thermocouple T1 avec une seule condition au limite connue qui est la température T1 ; ce type de problème est qualifié de problème mal posé et enfin une zone dans le bitume comprise entre le thermocouple T4 et l'interface bitume-granulat. Dans la zone directe le problème est discrétisé à l'aide d'un schéma aux différences finies implicite d'Euler pour la résolution du problème tandis que la zone inverse le problème est résolu par la méthode de Raynaud et Bransier [5] [6] [7]. Cette méthode permet d'accéder au flux et à la température à l'interface. Une fois le flux à l'interface connue, le problème dans le bitume est alors bien posé et peut aussi se résoudre par un schéma d'Euler implicite. Cette résolution fournit la température à la surface du bitume et nous déduisons la RTC qui en résulte. Une autre méthode [8] permet d'identifier directement la RTC sans passer par les flux et températures surfaciques. Le problème peut être également résolu par d'autres techniques de résolution de problèmes inverses utilisées dans les références [1] [8] [9].

### 4.2 Présentation de la démarche

On impose une RTC entre le bitume et le granulat en contact puis nous résolvons le problème global de conduction par schéma implicite. Nous obtenons alors les températures en tout point en particulier en  $x_1$  et

x2. Ensuite nous utilisons les températures obtenues aux points x1 et x2 comme des données d'entrée du problème inverse puis nous résolvons le problème inverse pour déterminer à nouveau la RTC appelée « valeur cible ». La méthodologie utilisée est la suivante :

1) Nous imposons une résistance de contact RTC égale à  $5 \times 10^{-4}$  Km<sup>2</sup>/W entre le bitume et le granulat et nous déterminons les températures dans le granulat et dans le bitume par résolution du problème global. Une solution analytique du problème peut être calculée uniquement dans le cas linéaire.

2) Supposons que les températures aux points x1 et x2 soient celles données par les thermocouples T1 et T2 de la FIG 1. Nous utilisons ces températures comme des données du problème inverse. Pour simuler les bruits de mesures, nous générons un bruit blanc de l'ordre de 0.03 °C sur les valeurs de température des thermocouples T1 et T2. Nous obtenons alors des résultats bruités  $Y_i = T_i \pm 0.03 \text{random}(-1,1)$ . On peut alors déterminer la température dans le domaine compris entre x1 et x2 à l'aide d'un schéma implicite classique.

3) A partir de la température T1 en x1 et des températures obtenues dans le domaine compris entre x1 et x2, la méthode de Raynaud et Bransier permet de déterminer la température et le flux à l'interface. Ce résultat est comparé avec le flux obtenu par le calcul direct (problème global) et par la solution analytique obtenue uniquement dans le cas linéaire.

4) A partir du flux surfacique et de la température T4 en  $x_4 = -10\text{mm}$ , nous déterminons la température du bitume à l'interface. Ce résultat est comparé avec ceux du calcul direct et de la solution analytique.

5) Lorsque les températures et le flux à l'interface sont connus, nous déterminons à nouveau la RTC à partir des températures de surface et du flux par la relation (4). A cette étape si la démarche est bien mise en œuvre on doit retrouver au bout de quelques instants la valeur de la RTC « cible » quelque soit le cas, linéaire ou non-linéaire. Ce temps est associé à la méthode de Raynaud Bransier (peu précise pour les premiers pas de temps). Lorsque les températures T1 et T2 sont bruitées, la RTC calculée l'est également à cause de la combinaison du bruit provenant à la fois des températures surfaciques et du flux. La RTC calculée oscille néanmoins autour de la valeur « cible ». Pour améliorer la méthode de détermination de la RTC, nous pouvons moyenner les valeurs obtenues sur un nombre de pas de temps donné.

### 4.3 Validation de la démarche

On se propose de résoudre le problème d'abord dans le cas linéaire puis dans le cas non linéaire en utilisant la démarche présentée dans le paragraphe 4.2. Le principal intérêt du cas non linéaire réside dans la prise en compte de variations importantes possibles des propriétés thermiques des matériaux utilisés.

Dans le cas linéaire, le problème formulé dans la partie 4.1 admet une solution analytique permettant de valider notre démarche. On impose une RTC « cible » égale à  $5 \times 10^{-4}$  Km<sup>2</sup>/W entre le bitume et le granulat en contact et on résout le problème direct. La FIG2 présente l'évolution des températures spatiales dans le granulat et le bitume en fonction du temps. A partir de ces données obtenues par la résolution du problème direct, on peut, par méthode inverse, déterminer l'évolution des températures du bitume et du granulat à l'interface et aux points x1 et x2 (FIG3) en fonction du temps. Les FIG 4 et 5 présentent l'évolution de la température du bitume et du flux thermique à en fonction du temps pour différentes méthodes. Les résultats obtenus à partir de méthodes de résolution analytique et numériques (méthode globale et inverse) ne montrent pas de différence significative. Une fois les températures et flux à l'interface obtenues, il est possible d'en déduire la RTC associée. Les FIG 6 et 7 présentent respectivement l'évolution de la RTC en fonction du temps pour des températures non bruitées et bruitées (étape 2 de la démarche du paragraphe 4.2). La réalisation de moyennes de RTC sur 1 seconde (10 pas de temps) permet de diminuer l'amplitude du bruit. La RTC calculée est égale à  $5 \pm 0.1 \times 10^{-4}$  Km<sup>2</sup>/W en moyenne (FIG7).

Dans le cas non linéaire, nous avons pris en compte la dépendance à la température des propriétés des matériaux décrites dans le Tableau 1. Les températures, le flux et la RTC sont alors calculés de façon itérative. Les profils spatiaux et temporels de températures, le flux surfacique et la RTC moyennée sont représentés respectivement sur les FIG 8, 9, 10 et 11. La dépendance à la température des propriétés des matériaux décrit dans le Tableau 1 influent les températures et le flux à l'interface mais n'affectent pas la RTC calculée. En effet, dans une démarche de validation de méthode inverse, il est nécessaire qu'on retrouve la RTC cible quelque soit le cas linéaire ou non-linéaire. La résolution du problème dans le cas non linéaire est indispensable pour l'étude du collage de liants bitumineux qui présentent un comportement thermosusceptible sur des granulats chauffés à des températures comprises entre 70 et 150°C.

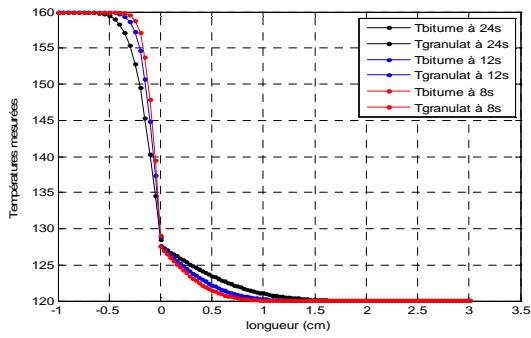


FIG 2: Profils de températures dans le bitume ( $x < 0$ ) et le granulat ( $x \geq 0$ ) à 8, 12, et 24 secondes : cas linéaire

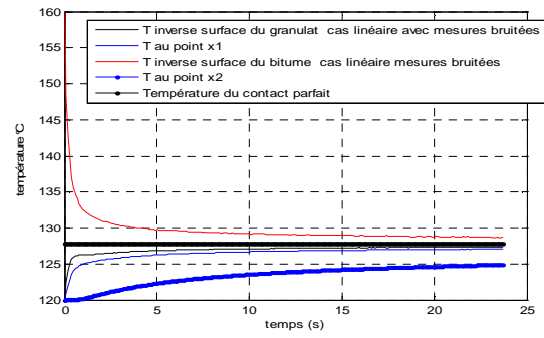


FIG 3: Températures du granulat et bitume à l'interface ( $x=0$ ) et aux points  $x_1$  et  $x_2$ : cas linéaire

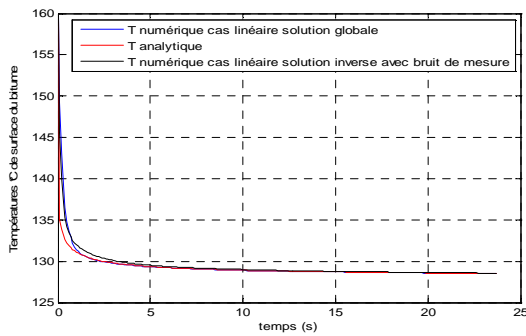


FIG 4: Température du bitume à l'interface ( $x=0$ ) pour différentes méthodes : cas linéaire

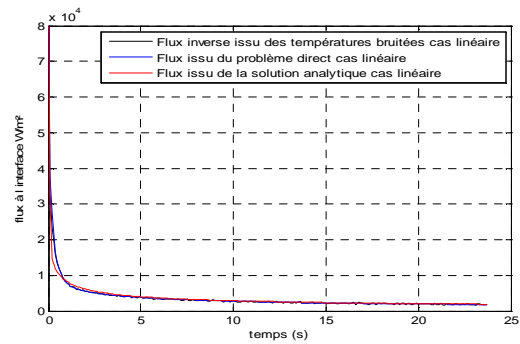


FIG 5: Évolution du flux thermique à l'interface ( $x=0$ ) en fonction de la méthode: cas linéaire

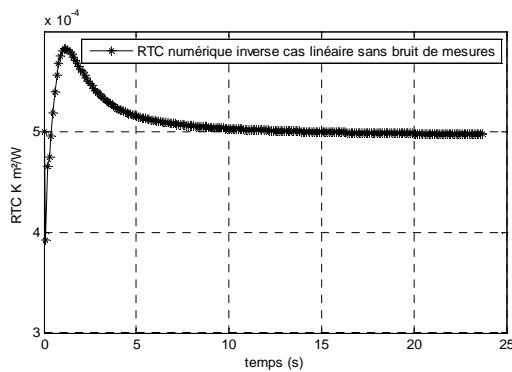


FIG 6: Évolution de la RTC : cas linéaire sans bruit de mesure

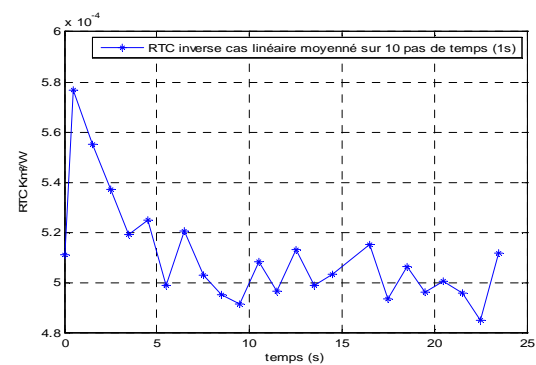


FIG 7: Évolution de la RTC moyennée sur 10 pas de temps : cas linéaire

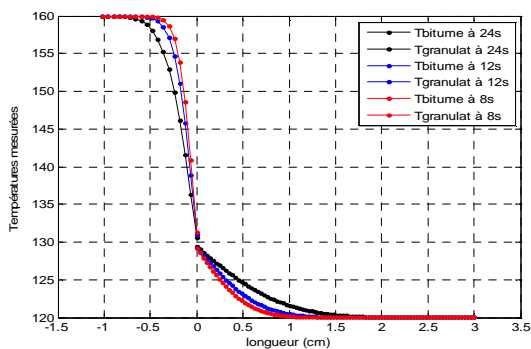


FIG 8: Profils de températures dans le bitume ( $x < 0$ ) et le granulat ( $x \geq 0$ ) à 8, 12, et 24 secondes : cas non-linéaire

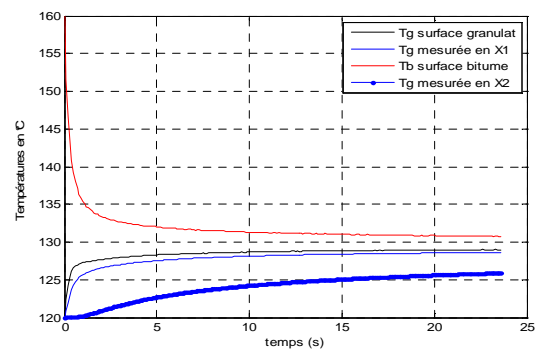


FIG 9: Températures du granulat et bitume à l'interface ( $x=0$ ) et aux points  $x_1$  et  $x_2$ : cas non-linéaire

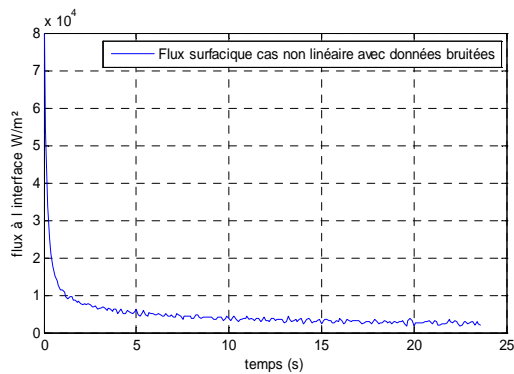


FIG 10: Flux surfacique inverse: cas non linéaire

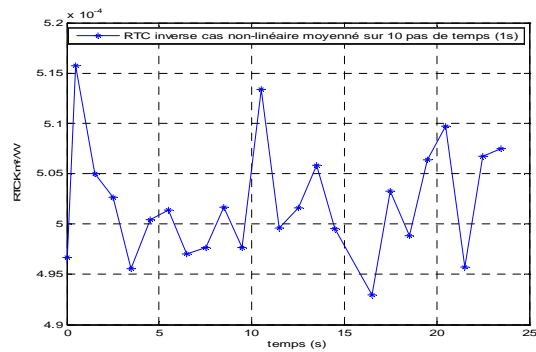


FIG 11: RTC moyennée sur 10 pas de temps : cas non-linéaire

L'intérêt de l'étude non-linéaire vient aussi du fait qu'on veuille prendre en compte dans la méthode de résolution les variations importantes de propriétés thermiques (saut de  $C_p$ ). Si nous considérons seulement le cas linéaire, les températures obtenues aux points  $x_1$  et  $x_2$  présenteront des écarts plus importants par rapport aux résultats de mesures qu'on effectuerait avec les thermocouples T1 et T2 par ce qu'on aura fait l'hypothèse que les propriétés thermiques des matériaux sont constantes. La prise en compte des non-linéarités permet une meilleure approximation des résultats expérimentaux.

## 5. Conclusion

Pour évaluer la qualité du collage du bitume sur un granulat dans des conditions similaires à celles de la fabrication des enrobés bitumineux nous proposons d'utiliser la RTC à l'interface bitume-granulat. Pour cela nous sommes amenés à résoudre des problèmes inverses pour déterminer les températures et le flux à l'interface. Dans cet article nous décrivons les propriétés thermiques des matériaux utilisés, le principe du dispositif expérimental de mesure de la RTC, la modélisation thermique de l'expérience et une démarche de résolution dans le cas linéaire et non linéaire adapté aux conditions de fabrication des matériaux bitumineux. La prise en compte de la non-linéarité montre des différences au niveau des températures du granulat et du bitume à l'interface ainsi que sur les flux surfaciques. Cette étude numérique précède des travaux expérimentaux qui permettront d'étudier la qualité du collage par l'intermédiaire de l'évaluation de la RTC en fonction de la nature du bitume et de l'état de surface du granulat. Pour être le plus proche possible de la réalité cette étude sera menée dans le cas non-linéaire.

## Références

- [1] Le Goff, R. Poutot, G. Delaunay, D. Fulchiron, R. Koscher, E. Study and modeling of heat transfer during the solidification of semi-crystalline polymers, *Int. J. Heat Mass Transfer* 48 (2005) 5417-5430.
- [2] Barth, E. J. Asphalt science and technology, Gordon and Breach science publishers New York London 1962, p 301-305.
- [3] Masson, J.F Polomark, G.M bitumen microstructure by modulated differential scanning calorimetry, *Thermochimica Acta* 374 (2001) 105-114.
- [4] Shell, bitumes techniques et utilisation, société des pétroles SHELL, P 56-57, 1991.
- [5] Cavalcanti, F. C. Caractérisation thermique de produits de l'état liquide à l'état solide, Thèse de l'INSA Lyon Janvier 2006.
- [6] Raynaud, M. Bransier, J. A new finite-difference method for the nonlinear inverse heat conduction problem, *Numer. Heat conduction part B*, 9, 27-42 1986.
- [7] Boutonnet, A. S. étude de la résistance thermique de contact à l'interface de solides déformables en frottement : application aux procédés de forgeage, Thèse de l'INSA Lyon Décembre 1998.
- [8] Loulou T. Étude expérimentale de l'évolution des conditions thermiques de contact lors de la solidification d'un métal tombant sur une paroi métallique refroidie. Thèse de doctorat, centrale Nantes, 1995.
- [9] Beck, J. Blackwell, B. Charles, R. S. and Clair, J. Inverse Heat Conduction: Ill-posed problems. Wiley Interscience, 1985.